

仮想 2 段及び 2 段スターリング型パルス管冷凍機の イナータンスチューブ、蓄冷材料に対する特性評価

Characterization to inertanc tube and regenerator material of Virtual Two Steps and Two Steps Stirling Type Pules Tube Cryocooler.

日本大学理工学部 電子情報工学科 (山本・岩田研究室)、
7018、市川 博亮
Department of Electronics & Computer Science、 (Yamamoto Iwata Lab.)
College of Science & Technology、 Nihon University、
B4、 Hiroaki Ichikawa

Abstract : 本実験の目的は SMES 実現に向けた 20K 級のスターリング型パルス管冷凍機の実現である。そのため、仮想 2 段冷凍機、2 段冷凍機を作製し実験を行った。仮想 2 段冷凍機を用いた実験ではイナータンスチューブ長 2.3m、蓄冷材料に SUS#100 メッシュを使用時にコールドヘッドが最低となり 115K を得た。2 段冷凍機を用いた実験では 2 本のイナータンスチューブの間にバルブを設け実験を行った。そして、イナータンスチューブを変化させたところ、イナータンスチューブ 3m 使用時に最低となり 108K を得た。

1. 背景

現在のところ、超伝導現象は低温でのみ発現する現象である。そのため、超伝導技術の実用化には冷却技術が必須となる。超伝導機器等の冷却には液体窒素や液体ヘリウム等の寒剤による方法があるが、今後の実用化を考えると冷凍機による冷却、あるいは寒剤と冷凍機を組み合わせた冷却が必須である。代表的な冷凍機には Gifford-MacMahon 冷凍機 (GM 冷凍機)、スターリング冷凍機がある。

超伝導技術は MRI や超伝導リニアなどすでに実用化されている物や実用化に近い物が多数ある。今後特に実用化が期待されるのはエネルギー関連である。エネルギー関連においては超伝導の発見以来、その大電流を高電流密度で損失無く流すことが出来る特徴と高い磁界を損失無く発生できる特徴から、多くの応用が考えられてきた。その例として、超伝導磁気エネルギー貯蔵装置 (Superconducting Magnetic Energy Storage : SMES)、超伝導限流器、フライホイールエネルギー貯蔵装置などが挙げられる。本研究では国家プロジェクトとして積極的に研究・開発が行われている SMES 冷却用の冷凍機の開発を視野に入れて行った。SMES の冷却には冷凍能力 20K10W、COP0.1% を持った冷凍機が要求されている。このことから、SMES をはじめとした大型の超伝導機器の実用化には消費電力 4kW 前後の大型パルス管冷凍機の効率の向上が必須である。

そこで我々は、これまでに 1 段スターリング型パルス管冷凍機を用い、蓄冷材料に SUS メッシュを使うことで、電気入力 4kW で最低到達温度 43.9K という実験結果を得た。^[1]

そして、さらなる最低到達温度の向上の為、1 段ではなく 2 段のスターリング型パルス管冷凍機と、2 段スターリング型パルス管冷凍機の性能を測定する為の装置として、仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機を設計・作製を行った。この多段化の理由は、2009 年に Jingjing University の Pengda yan らによって 1 段目のコールドヘッドが 93.3K、2 段目が 14.2K という結果が報告され、多段化した事によって最低到達温度が低下したとが示されているからである。

本実験では始めに仮想 2 段スターリング型パルス管冷凍機により特性評価と位相測定を行い、その後 2 段冷凍機によって性能の向上を目指した。

2. 目的

本究の目的は、上で述べたような高い冷凍能力を持った冷凍機を作製するため、2 段スターリング型パルス管冷凍機を作製し評価を行った。

その方法として、始めに仮想 2 段実験で冷凍機の最適化の手がかりを掴む為に特性評価を行った。

そこで得た問題点を 2 段冷凍機で解決するべく位相制御機構である、イナータンスチューブの長さの最適化と、長さだけではなく、2 本のイナータンスチューブ間にバルブを設けることにより、位相を変化させることができないかと考え実験を行った。

3. 実験方法・条件

図 1 に仮想 2 段冷凍機の外観図、図 2 に概略を示す。表 1 に実験条件 1 を示す。

イナータンスチューブの長さは 2.3m、0.6m。圧力振動源の動作周波数は、過去の 1 段の実験結果により、イナータンスチューブの長さや径、パルス管の長さを決定した際に、最適化された値が 55Hz であるため使用した。蓄冷器の中にステンレスメッシュを積層。このステンレスメッシュとは、たとえば、#400 は 1inch に 400 個の穴が空いているものことで、メッシュに気体を通る時の圧力損失の大きさは#400>#250>#200 の順になっている。このメッシュを低温端から、#400 を 400 枚、#250 を 500 枚、#200 を 140 枚積層した。熱交換器に水を 36l/min で流し予冷を行ってから実験を行った。作業流体は He とし 2.0MPa で封入した。

表 2 に実験条件 2 を示す。

イナータンスチューブの内径 $\Phi 6.4\text{mm}$ 、肉厚 1.5mm、長さ 3m を使用し、変換フランジ内部の蓄冷材料未使用時と SUS#100 を使用した。その他の条件は実験 1 と同様とした。図 3 に 2 段冷凍機の外観図、図 4 に概略を示す。

表 3 に実験条件 3 を示す。

イナータンスチューブの長さは 2m、2.5m、3m を使用し、動作周波数は仮想 2 段実験と同様に 55Hz、2 段目蓄冷器も仮想 2 段実験と同様とした。

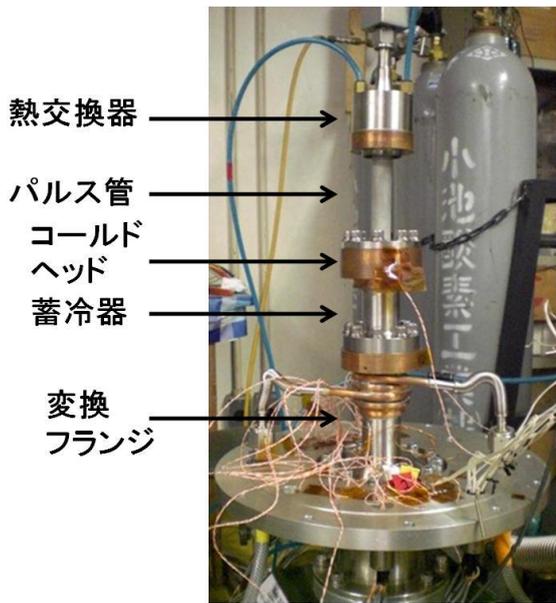


図1 仮想2段冷凍機外観図

イナータンスチューブ

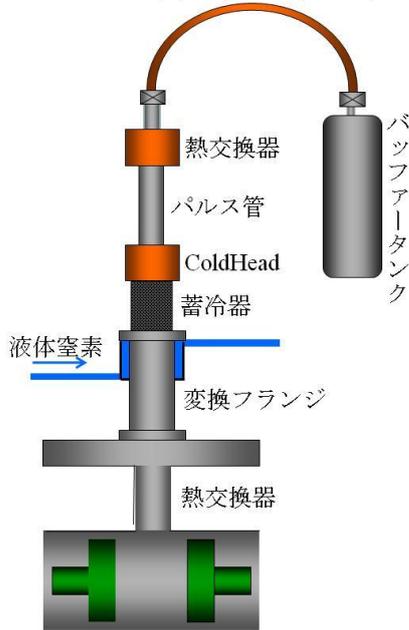


図2 仮想2段冷凍機概略図

表1 実験条件1

運転周波数(CFIC社)	55Hz
ピストン変位	16mm _{p-p}
パルス管径	Φ20mm
パルス管長	100mm
蓄冷器径	Φ38.1mm
蓄冷器長	73mm
蓄冷材料	#400(400枚) #250(500枚) #200(140枚)
変換フランジ	#250(300枚) #200(1000枚)
水冷	36ℓ/min
液体窒素封入圧力	0.05MPa
イナータンスチューブ(外形、肉厚、長さ)	1/2inch, 1mm, 2.3m & 0.6m
バッファータンク	3.78ℓ
作業流体	He
封入圧力	2.0MPa

表2 実験条件2

蓄冷材料	SUSメッシュ #400(400枚) #250(500枚) #200(140枚)
変換フランジ	未使用 #100 真鍮バルク体
イナータンスチューブ(外形、肉厚、長さ)	1/2inch, 1mm, 2m

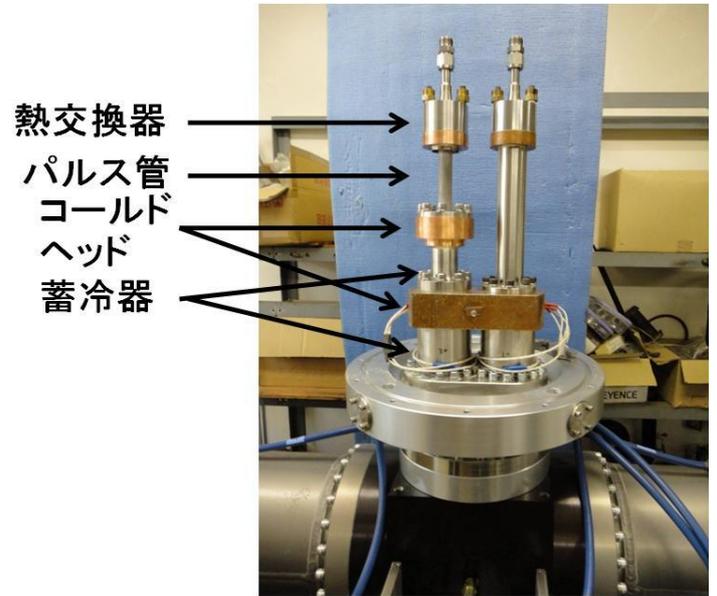


図3 2段冷凍機外観図

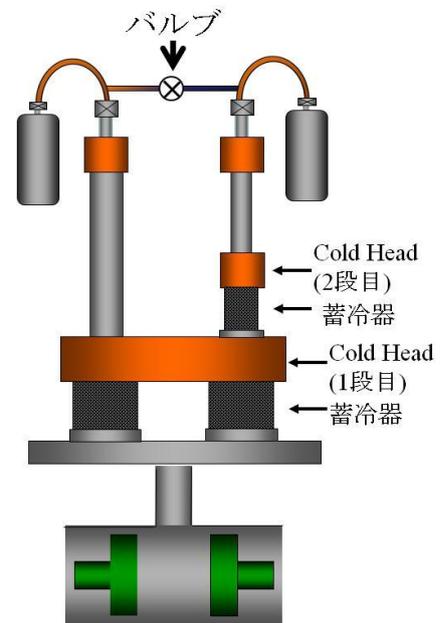


図4 2段冷凍機概略図

表 3 実験条件 3

運転周波数	55Hz
2 段側パルス管径	Φ20mm
2 段側パルス管長	100mm
2 段側蓄冷器径	Φ38.1mm
2 段側蓄冷器長	73mm
2 段目蓄冷材料	#400(400 枚) #250(500 枚) #200(140 枚)
1 段目蓄冷材料	#400(400 枚) #250(500 枚) #200(330 枚)
水冷	36ℓ/min
イナータンスチューブ(外形、肉厚、長さ)	1/2inch, 1mm, 2m 1/2inch, 1mm, 2.5m 1/2inch, 1mm, 3m
バッファータンク	3.78ℓ
作業流体	He
封入圧力	2.5MPa

4. 評価方法・条件

仮想 2 段実験ではコールドヘッド、変換フランジ上部の温度を測定し評価を行った。温度測定には林電工の白金測温体 CRZ-2005 (pt100) を使用した。2 段実験も仮想 2 段実験と同様に行ったが、白金測温体ではなくより精度の高い CHINO の白金・コバルト測温体 R800-6 (pt100) を用いた。測定箇所は、仮想 2 段の変換フランジに相当する 1 段目のコールドヘッドと、2 段目のコールドヘッドとした。

5. 結果

実験条件 1 のイナータンスチューブ長 0.6m 時の実験結果を図 5 に示す。本実験では予冷を行い、動作開始してから液体窒素の封入圧力を 0.05MPa にして実験を行った。変換フランジの最低到達温度は 118K、コールドヘッドの最低到達温度は 128K を得た。この実験でも変換フランジの温度が上昇している時は、タンクに液体窒素を追加した。しかし、この実験で最低到達温度を迎えてからは、変換フランジの最低到達温度が液体窒素の封入圧力に依存していない事がわかり、実験開始から 167 分経過したところから、液体窒素を追加する回数が激減した。

実験条件 1 のイナータンスチューブ長 2.3m の時の実験結果を図 6 に示す。始めに予冷を行い、変換フランジが最低到達温度を迎えてから、封入圧力を 0.01MPa に変えて実験を行った。実験結果は、変換フランジの最低到達温度は 113K、コールドヘッドの最低到達温度は 150K を得た。

実験条件 2 の蓄冷材料を未使用時の実験結果を図 7 に示す。この実験でも予冷を行ってから実験を行った。実験結果をみると、変換フランジの温度が上昇していることがわかる。この実験では、実験中の液体窒素の封入圧力を 0.15MPa まで上昇させて実験を行ったが、最低到達温度を維持することができず、室温まで上昇した。この実験のコールドヘッドの最低到達温度は 164K を得た。

実験条件 2 の蓄冷材料を SUS#100 にした時の実験結果を図 8 に示す。コールドヘッドの最低到達温度は 115K、変換フランジの最低到達温度は 96K を得た。

実験条件 3 のイナータンスチューブ 2m の実験結果を図 9 に示す。この実験は始めにバルブを閉鎖した状態で実験を開始した。実験結果は、バルブ閉鎖時に、1 段目の最低到達温度は 69.1K、2 段目の最低到達温度は 187.6K を得た。そして実験開始から 61 分経過したところでバルブを開放し実験を行うと、1 段目の温度は上昇し最低到

達温度は 115.0K、2 段目の温度は低下し最低到達温度は 110.0K を得た。

実験条件 3 のイナータンスチューブ 2.5m の実験結果を図 10 に示す。この実験では、実験開始時はバルブを開放して行ったが、実験開始から 46 分経過したところでバルブを閉鎖し実験を行った。実験結果は、バルブ閉鎖時には、1 段目の最低到達温度は 71.2K、2 段目の最低到達温度は 143.9K を得た。そして実験開始から 85 分経過したところでバルブを開放すると、1 段目の温度は上昇し最低到達温度は 116.0K、2 段目の温度は低下し最低到達温度 101.1K を得た。

実験条件 3 のイナータンスチューブ 3m の実験結果を図 11 に示す。この実験も実験開始時はバルブを閉鎖して実験を行ったが、実験開始から 45 分経過したところでバルブを閉鎖し実験を行った。実験結果はバルブ閉鎖時には、1 段目の最低到達温度は 81.7K、2 段目の最低到達温度は 104.8K を得た。そして実験開始から 100 分経過したところでバルブを開放すると、1 段目の温度は上昇し最低到達温度は 108.0K、2 段目の温度は低下し最低到達温度は 97.1K を得た。

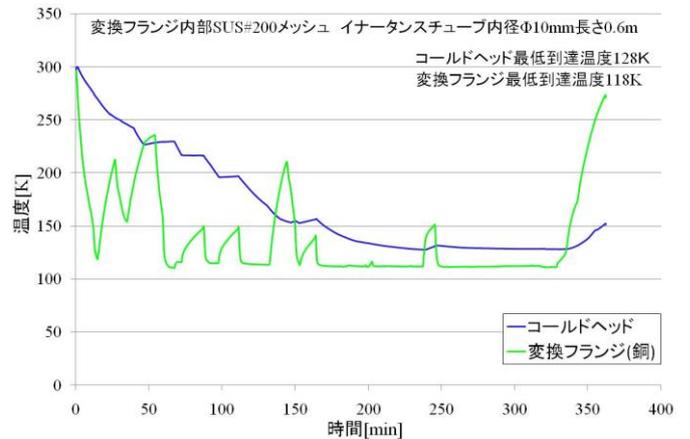


図 5 実験条件 1、イナータンスチューブ長 0.6m

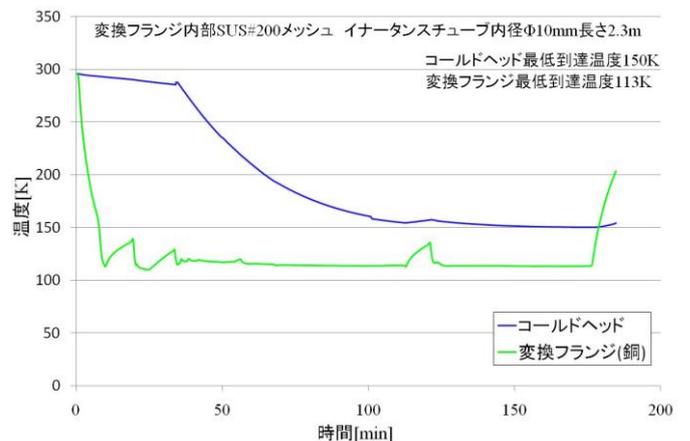


図 6 実験条件 1、イナータンスチューブ長 2.3m

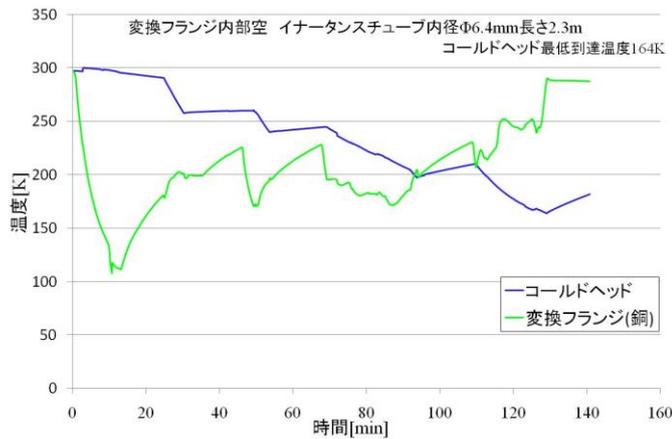


図 7 実験条件 2、変換フランジ内部の蓄冷材料未使用

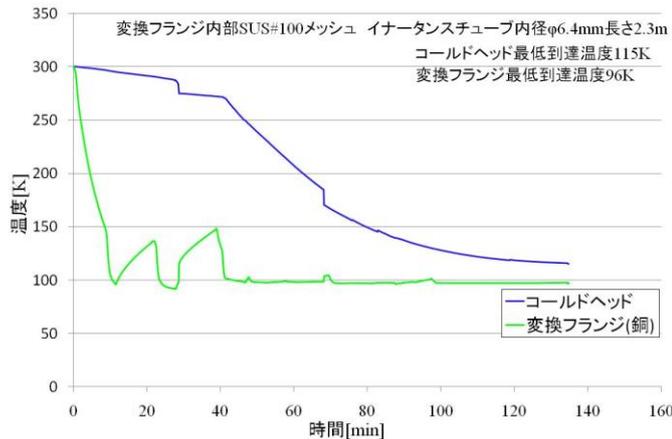


図 8 実験条件 2、変換フランジ内部蓄冷材料#100 使用

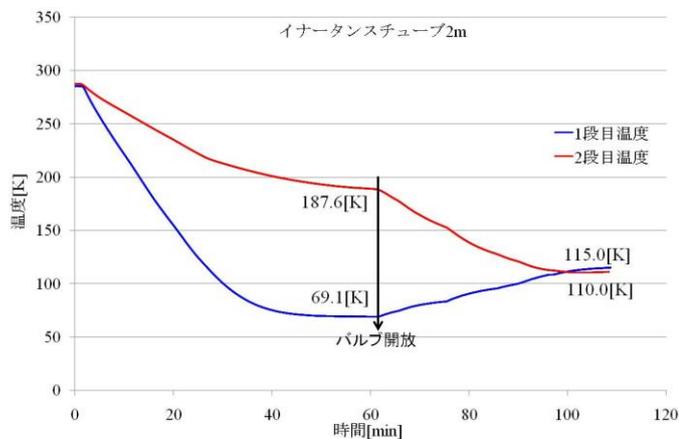


図 9 実験条件 3、イナータンスチューブ 2m

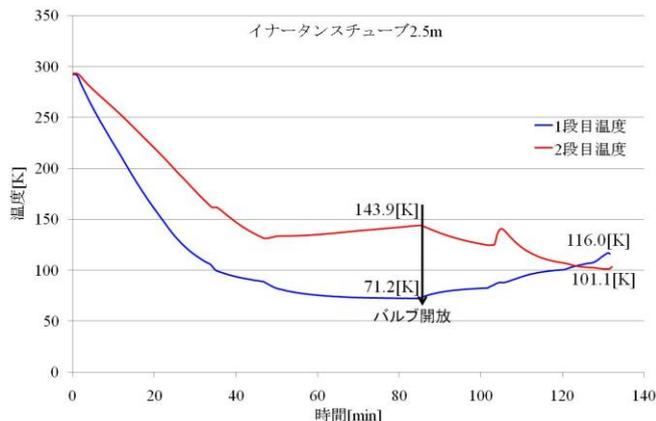


図 10 実験条件 3、イナータンスチューブ 2.5m

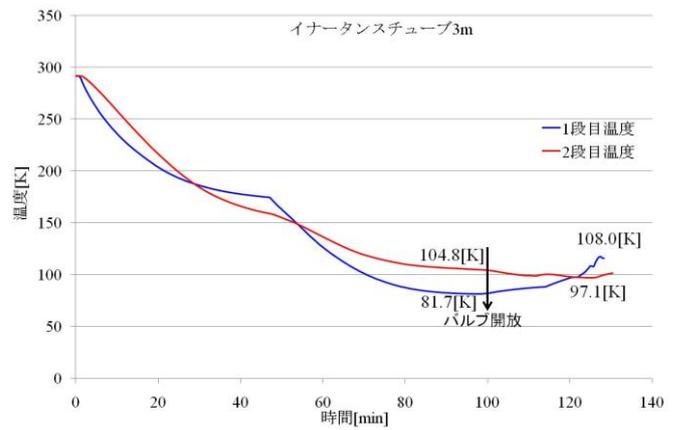


図 11 実験条件 3、イナータンスチューブ 3m

6. 考察

実験条件 1 の結果から、変換フランジは十分に冷却出来ているが、コールドヘッドの最低到達温度が変換フランジの最低到達温度を下回ることがなかった。この問題をイナータンスチューブの長さを変えることによって解決できると考えていたが、大きな変化は見られなかった。この理由は、変換フランジ内部にも SUS メッシュを積層しており、この部分での気体の圧力損失が大きいためと考えられる。そこで、実験条件 2 ではフランジ内部の蓄冷材料を変化させて実験を行った。

実験条件 2 の結果から、変換フランジ内部には蓄冷材料が必要であることがわかる。さらに、この蓄冷材料に前の実験で使用した SUS#200 を用いた場合の最低到達温度は 110K、SUS#100 を用いた場合 96K を得、変換フランジの最低到達温度が蓄冷材料によって変化することもわかる。

また、この実験で変換フランジでの蓄冷材料を変化させ、圧力損失を減少させたことで、コールドヘッドの最低到達温度が低下した。このことから、さらに変換フランジでの圧力損失を減少させる必要がある。

しかし、本実験を通じてコールドヘッド部の最低到達温度が変換フランジの最低到達温度より低下していないことから、本実験で使用しているパルス管が以前まで使用していたものと比べ、長さ・径ともに小さくなっていることから、作製したパルス管で冷却するには限界があると考え、パルス管が並列に 2 本並んでいる並列 1 段スターリング型パルス管冷凍機(以降並列 1 段)を使用し、片側のパルス管を仮想 2 段実験で使用した蓄冷器とパルス管を使用し、2 段スターリング型パルス管冷凍機を用いた実験を行った。

実験条件 3 の結果から、イナータンスチューブの長さを長くすることで、バルブ閉鎖時、開放時共に 2 段目の最低到達温度が低下していることがわかる。このことから、イナータンスチューブを更に長くすることで、2 段目の最低到達温度を低下させることが可能なことを示唆している。

さらに、本実験ではバルブを開放した場合の方が 2 段目の温度が低下している。この理由は、バルブを開放することにより 1 段目上部のパルス管内の作業流体が 2 段上部のパルス管に流れ込むことによって、1 段目の温度が上昇し、2 段目の温度が低下していると考えられる。

7. 課題と解決方法

実験条件3の結果から、バルブを解放すると1段目の温度が上昇してしまうことから、今後の実験ではパルス管を独立して動作させる必要があることがわかる。

また、本実験で使用しているパルス管が以前まで使用していたものと比べて、小さいことからパルス管内の作業流体を増加させるためパルス管を長くするという方法が考えられる。

さらに、本実験では2段冷凍機の実験において、蓄冷材料の最適化を行っていないので、蓄冷材料の最適化も必要である。

8. まとめ

超伝導の冷却方法として、寒冷材を使用しない冷却技術が必要とされている。過去の実験において1段スターリング型パルス管冷凍機を用いて43.9[K]を得た。

始めに仮想2段実験で冷凍機の最適化の手がかりを掴む為に特性評価を行った。

そこで得た問題点を2段冷凍機で解決するべく位相制御機構である、イナータンスチューブの長さの最適化と、長さだけではなく、2本のイナータンスチューブ間にバルブを設けることにより、位相を変化させることができないかと考え実験を行った。

コールドヘッド部の温度が最低となった実験条件は、変換フランジ内部の蓄冷材料をSUS#100を使用した場合で、変換フランジの最低到達温度が96K、コールドヘッド部の最低到達温度が119Kを得た。この実験を考察するに、変換フランジ内部の蓄冷材料を変化させ、圧力損失を減少させたことでコールドヘッド部の最低到達温度が低下した。このことから、さらに変換フランジ内部での圧力損失を減少させる必要があることが予想される。

2段スターリング型パルス管冷凍機を用いた実験では、2本のイナータンスチューブの間にバルブを設け実験を行った。この実験で2段目の最低到達温度が最低となった条件はイナータンスチューブ3m時でバルブを閉鎖時に、1段目の最低到達温度が81.7K、2段目の最低到達温度が104.8Kを得た。、バルブ開放時に、1段目の最低到達温度は108.0K、2段目が97.1Kを得、バルブを開放することで2段目の最低到達温度が低下した。

さらに、本実験ではバルブを開放した場合の方が2段目の温度が低下している。この理由は、バルブを開放することにより1段目上部のパルス管内の作業流体が2段上部のパルス管に流れ込むことによって、1段目の温度が上昇し、2段目の温度が低下していると考えられる。

よって今後の実験ではパルス管を独立して動作させる必要があり、更なる低温域を目指すには、2段側の蓄冷材料の最適化や、パルス管を長くするという方法が考えられる。

9. 参考文献

- 1)萩原宏康、低温工学概論、東京電気大学出版局
- 2)小林清志、工業熱力学、理工学社
- 3)富永昭、熱音響工学の基礎、内田老鶴園
- 4)早坂寿雄、音響工学入門、日刊工業新聞社
- 5)田沼静一、馬宮孝好、近低温、共立出版株式会社
- 6)低温工学協会 関西支部 海外低温工学研究会、低温工学ハンドブック、内田老鶴園
- 7)低温工学協会、超伝導・低温工学ハンドブック、オーム社

